컴퓨터 그래픽스를 이용한 해체 공정 시나리오 예비 평가

박희성*, 김성균*, 이근우*, 정종헌,* 박진호*, 진성일**
*한국원자력연구소 원자력 연구시설 해체 기술개발
**충남대학교 정보통신공학부 컴퓨터과학과
e-mail : parkhs@kaeri.re.kr

Application of computer graphics for a preliminary evaluation of dismantling scenario

Hee-Seong Park*,
Sung-Kyun Kim, Kyne-Woo Lee, Chong-Hun Jung, Jin-Ho Park, Seong-Il Jin**

*Dept. of D&D Technology R&D Division, KAERI
**Dept. of Computer Science, Chungnam National University

요 약

원자력 시설 및 연구용 원자로 해체 시 해체 공정의 효율성을 증진시키기 위해 컴퓨터 그래픽스를 이용한 해체 공정의 최적화 연구가 수행되었다. 애니메이션 설계를 위해 해체 시설 및 구조물과 해체 장비의 모델링이 완료되었으며, 방사능에 오염된 대상물의 방사능 분포도를 위치별, 준위별로 확인할 수 있도록 3 차원으로 나타내었다. 해체 일정과 해체 폐기물량 그리고 해체 비용을 모사하기 위해 각 정보들에 대한 평가식과 가중치 값을 도출하였다. 연구로 1 호기 Thermal column 을 대상으로 애니메이션을 통한 해체 공정절차 시각화와 단위 해체 공정 시나리오를 수행한 결과 애니메이션의 경우 해체 현장과 동일하게 모델링 되어 현장 작업자들이 해체 공정 절차를 쉽게 이해할 수 있다는 것을 확인하였으며, 시나리오 별 해체 소요시간과 폐기물량 그리고 해체 비용의 경우 정상적으로 모사가 수행됨으로써 단위 해체 공정에 대한 최적의 시나리오를 평가 할 수 있는 기초 연구의 틀을 마련하였다. 본 시스템은 해체 관리자, 해체 시스템 분석가, 해체 현장 감독과 해체 작업자들의 중요한 협업도구로 활용될 것으로 사료된다.

1. 서 론

서울 공릉에 위치한 연구용 원자로를 폐기하기로 결정함에 따라 한국원자력연구소는 2000 년 11 월에 정부로부터 승인을 얻어 해체 활동을 현재까지 진행하고 있다[1].

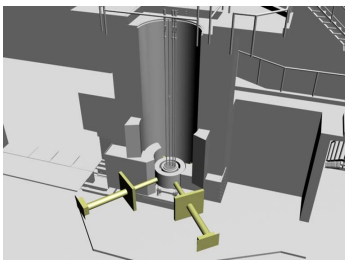
원자력 시설의 해체 활동은 해체 기획부터 해체된 폐기물을 처분하기 까지 복잡한 공정을 거쳐야 한다. 특히 오랜 기간의 자료 부재로 인해 아직도 해체 시나리오 기획과 절차 수립 및 설계과정에서 2D 청사진에 의존하고 있기 때문에 방사능에 오염된 시설물의 해체 활동은 작업자의 안전성을 위협하고, 해체 작업 시간을 지연시키며, 해체 비용의 과도한 지출을 초래하게 된다. 원자력 시설을 해체하고 있는 나라들은 진보된 컴퓨터 기술을 이용하여 해체 활동으로부터 발생되는 여러 문제점들을 해결하고 있으며, 복잡한 해체 업무를 효율적으로 관리하고 있다. 원자력 시설의 해체와 관련한 기술을 살펴보면 가압중수로 발전소 해체 시 콘크리트 폐기물 관리를 위한 시스템[2], 해체 일정과 해체 폐기물 및 작업자 피폭 최적화를 위한 시스템[3, 4, 5], 해체 기획과 평가를 위한 엔지니어링

시스템[6], 해체 비용을 평가하기 위한 시스템[7] , 그리고 3D CAD 를 활용한 기술 등이 있다[8, 9]. 최근에는 애니메이션 기술[10, 11]이 원자로 시설 운영 및 유지 보수에 많이 이용되고 있고, 작업자의 피폭선량 평가와 작업자의 거동을 연계한 3 차원 시뮬레이션 시스템을 개발하여 원자력 시설의 제염 해체에 ALARA 문제를 평가[12, 13]하고 있으며, 또한 이 시스템은 원자력 시설 중 핫셀 해체에 적용하여 방사능에 오염된 지역에서 해체 활동을 할 경우 작업자의 안전성을 실험한 사례가 있다[14]. 이들 시스템들은 주로 단일 구조물에 대하여 제한적인 범위에서 일정 정보들을 모사하기 때문에 해체 활동으로부터 초래되는 정량적인 평가가 불가능하다는 문제점을 안고 있다. 이에 저자는 해체 작업자의 안전성과 해체 비용의 경제성을 평가하기 위해 컴퓨터 그래픽 기술을 이용하여 애니메이션 모듈과 시뮬레이션 모듈을 구축 한 후 연구로 1 호기 Thermal column 을 대상으로 해체 공정 시나리오 최적화 연구를 수행하였다.

2. 해체 공정 가시화 및 예비 평가

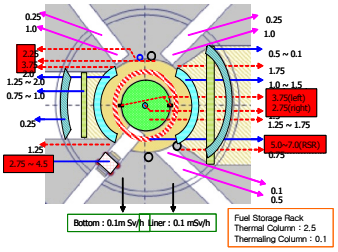
가. Thermal Column

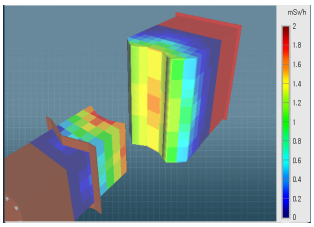
원자로 수조 내 남쪽에 위치하고 있는 Thermal column 은 수평과 수직으로 나뉘어져 있으며, 알루미늄 재질로 되어 있다. 수평 Thermal column 차폐문은 두께가 1.6m 이며, 밀도가 3.5g/cm^3 인 고밀도 콘크리트로써, 총 중량은 20 톤 정도이다. 이에 비해 수직 thermal column 은 일반 재질의 콘크리트로 차폐되어 있다. 방사선학적 상태는 대부분 알루미늄 및 고 순동의 흑연으로 제작되어 원자로의 운전시 방사화 정도는 높지 않으나 흑연 내 불순물로 인해 방사화되어 있을 것으로 예상된다. 해체 공정 절차를 위한 애니메이션과 시나리오 예비 평가를 위해 2004 년 1 월 19 일부터 2004 년 12 월 30 일 동안의 해체 활동 자료를 검토 분석한 결과 원자로 노심을 구성하고 있는 여러 구조물 중 방사화 정도가 높고, 해체 시간이 많이 소요된 Thermal column 을 실험대상으로 선정하였다.



연구로 시설 및 Thermal column 의 애니메이션 설계는 AutoCAD 와 3DS MAX 프로그램을 이용하여 모델링 하였다. 방사능에 조사된 Thermal column 의 3 차원 분포도는 Thermal column 표면과 주위 방사선량률을 측정한 데이터와 방사선 차폐체 선량 평가에 사용되는 일점선원(point kernel) 방정식으로부터 산출된 데이터를 이용하였고, EON script 프로그램으로 분포도를 가시화 시켰다.

아래 왼쪽 그림은 Thermal column 과 thermalizing column 주위에서 측정한 방사능 값을 나타내고 있으며, 이들 값을 기초로 Thermal column 구조물을 800 개 node 로 분할하여 결과를 가시화 시킨 방사능 분포도를 오른쪽 그림에서 보여주고 있다.





나. 해체 시나리오 선정 및 평가식 도출

플라즈마 아크와 니블러 장비를 채택하여 플라즈마 공법을 사용한 시나리오 1 과 니블러 장비를 사용한 시나리오 2 에 대하여 애니메이션과 시뮬레이션 실험이 이루어졌다.

▪ 해체 장비 모델링

플라즈마 아크와 니블러에 대한 모델링은 3DS MAX 프로그램을 사용하여 모델링이 이루어졌다.

▪ 해체 공정 절차

선정된 시나리오 1 과 시나리오 2 의 해체 공정 절차는 다음과 같다.

- 시나리오 1: 수조수 배수→노심 분리→노심 저장용기로 이송→Thermal column door open→ Thermal column survey→ Thermal column 흑연제거→ Thermalizing column 보랄시트 bolt 제거→ Thermalizing column 흑연제거→흑연 폐기물 수조 밖으로 이송 플라즈마 장비 이용 Thermal column 세절→ 플라즈마 장비 이용 Thermalizing column 세절→폐기물 수납
- 시나리오 2: 수조수 배수→노심 분리→노심 저장용기로 이송→Thermal column door open→ Thermal column survey→ Thermal column 흑연제거→ Thermal column 보랄시트 bolt 제거→ Thermalizing column 흑연제거→흑연 폐기물 수조 밖으로 이송 →플라즈마 장비 이용 Thermal column 전단부 절단→니블러 장비 이용 Thermal column 세절→ 플라즈마 장비 이용 Thermalizing column 전면부 절단→ 니블러 장비 이용 Thermalizing column 세절→ 폐기물 수납

위와 같은 해체 절차에 따라 시나리오 별로 해체활동이 이루어질 때 소요되는 해체 일정과 발생되는 해체 폐기물량 그리고 해체 비용을 평가하기 위한 평가식을 수립하였다.

▪ 해체 일정

해체 작업 시간은 해체 작업별 산출 인력, 투입 인원수, 해체 기본 단위 시간, 작업 회수 그리고 가중치에 대한 변수를 고려하였다.

$$T = \sum_{i=1}^{n} \frac{T_i}{N \cdot 8}, \qquad T_i = BT_i \cdot R_i \cdot \left(1 + \sum_{j=1}^{n} W_j\right)$$

▪ 해체 폐기물량

절단된 폐기물의 밀도와 부피를 계산하며, 각 폐기물의 부피를 합산하여 전체 폐기물량을 산출할 수 있도록 수식을 전개하였다.

$$V = \sum_{i=1}^{n} \rho_i \cdot m_i$$

▪ 해체 비용

전체 해체 비용은 인건비(PE), 장비비(TE), 그리고 폐기물 처리비(WE)의 합으로 계산된다.

$$PE = \sum_{i=1}^{n} T_i \times AMC$$

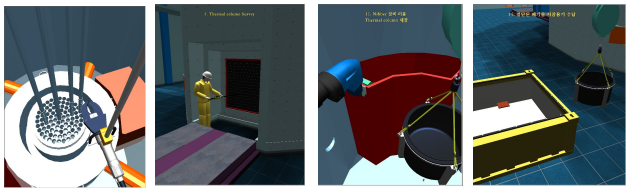
$$TE = \sum_{i=1}^{n} M_i \times NOM_i$$

$$WE = \sum_{i=1}^{n} D_i \times \frac{V_{total\ \ waste}}{V_{waste\ \ drum} \cdot P}$$

AMC 는 작업자의 평균 인력 단가를 의미하며, NOMi 는 해체 장비의 평균 투입 대수를 의미한다.

3. 애니메이션과 시뮬레이션

Thermal column 을 대상으로 시나리오 별로 해체하는 과정을 애니메이션으로 처리하기 위해 연구로 시설과 구조물, 해체 작업자 및 해체 장비를 3 차원으로 모델링 하였다. 애니메이션은 원자력 시설 내부에서 작업자가 이동하면서 수동이나 원격으로 해체 활동이 이루어지기 때문에 선정된 시나리오에서 단계별로 뷰포인트를 설정하여 해체 처리 과정을 쉽게 이해할 수 있도록 하였으며, 해체 절단과 절단된 폐기물 이송 및 작업자의 이동경로에서 발생할 수 있는 충돌 및 간섭은 EON 프로그램의 collision 모듈에서 제공하는 기능을 이용하여 해결하였다. 다음 그림은 시나리오 2 의 애니메이션에서 설계된 노심절단과 Thermal column survey, 니블러 장비를 사용한 Thermal column 세절, 그리고 폐기물의 저장용기 수납 과정을 보여주고 있다.



애니메이션에서 사용된 해체 공정 절차에 맞게 입력 데이터를 편성하였다. 가중치 값을 크게 5 개(작업 위치, 방사능량, 절단 시 분진으로부터 보호, 보호장비 착용, 휴식)로 구분하였으며, 2 개의 시나리오에서 고려된 작업 범위는 전처리 작업과 해체 작업 그리고 폐기물을 처리하는 후처리 작업으로 분류하여 여기에 투입되는 작업자들의 수를 전처리 작업에 3 명, 해체 작업에 5 명 그리고 후처리 작업에 2 명이 투입된다고 가정하였다. 플라즈마 아크 공법을 사용한 시나리오 1 과 니블러 공법을 이용한 시나리오 2 에 대하여 시뮬레이션을 수행한 결과 해체 일정과 해체 폐기물 그리고 해체 비용의 경우 플라즈마 아크 장비를 사용한 시나리오 1 공법이 thermal column 해체에 우수함을 알 수 있었다. 다음 왼쪽 그림은 플라즈마 공법으로 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있으며, 오른쪽 두개의 시나리오를 비교 평가한 결과를 한 화면으로 보여주고 있다.

4. 결 론

컴퓨터 그래픽 애니메이션과 시뮬레이션을 통하여 연구용 원자로 1 호기 Thermal column 을 대상으로 단위 해체 공정의 최적화 연구가 수행되었다. 애니메이션 설계 결과 해체 시설물과 구조물, 해체 장비 및 작업자 이동경로 등이 해체 현장과 동일하게 모델링 되었으며, 해체 활동 시 발생되는 충돌과 간섭효과 역시 다른 구조물에 영향을 주지 않도록 잘 설계되었다. 해체 작업자들이 원자로 안과 밖에서 수동 및 원격 작업을 해야 하는 특성을 고려하여 다양한 뷰 포인트를 설정한 결과 현장 작업자들이 시나리오를 쉽게 이해할 수 있었다. 해체 현장 데이터와 이를 기반으로 만들어진 방정식을 이용하여

수행한 시뮬레이션을 결과는 플라즈마 아크를 사용하는 시나리오 1 이 최적의 공정을 제시하고 있음을 확인되었다.

컴퓨터 그래픽스를 응용한 해체 공정 최적화는 가상의 해체 현장에서 수행되는 해체 활동을 동일하게 시연해 봄과 동시에 시뮬레이션을 통해 해체가 진행되면서 발생할 수 있는 여러 문제점을 검토하고 분석할 수 있는 도구가 될 수 있음을 확인할 수 있었으며, 본 논문의 결과는 다른 주요 해체 기술에도 적용이 가능할 것으로 사료된다. 향후에는 시뮬레이션에 사용된 평가식과 가중치 값을 다양한 해체 결과 데이터를 근간으로 현실적으로 수정 보완 되어야 할 것이며, 독립적으로 운영이 되고 있는 애니메이션과 시뮬레이션 모듈을 연계시켜 해체 공정의 신뢰와 효율성을 증가시킬 계획이다.

참고문헌

1.정기정 외., “연구로 1 호기 및 2 호기 폐로 사업 해체 계획서”, KAERI/TR-1654/2000

2.Michel Klein et al., "The Management of Radioactive Concrete Arising from the Dismantling of a Pressurised Water Reactor: The R&D Project on the Recycling of Radioactive Concrete", Radioactive Waste Management and Environment Remidation-ASME 2001.

3.Yukihiro Iguchi et al., "Development of a Decommissioning Engineering Support System of the Fugen NPS", 11th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE11-36270, Tokyo, JAPAN, April 20-23, 2003.

4.Julia L. Tripp et al., "Tools for Optimal Waste and Exposure Reduction", WM '02 Conference, Feb. 24-28, 2002.

5.Yuri N. Kuznetsov et al., "The Innovative technology of Nuclear Power Plant decommissioning", Radioactive Waste Management and Environment Remediation, ASME- 2001.

6.S. Yanagihara, " COSMARD: Code System for Management of JPDR Decommissioning", J. Nucl. Sci. Technol., 30(9), 890(1993).

7.Roy Manning, Jeremy Gilmour, "Decommissioning Cost Estimating the Price Approach", Waste Management 2002, Tucson AZ, Feb 2002.

8.Charles E et a., "Computer Mapping and Visualization of Facilities for Planning of D&D Operations", Radioactive Waste Management and Environment Remidation-ASME 1995.

9.Jacques Pot et a., "Techniques for CAD reconstruction of ‘as-built’ environments and application to preparing for dismantling of plants", Nuclear Engineering and design 178, 135-143, 1997.

10.D J Lee et al., "Virtual reality for Inspection, Maintenance, Operation and Repair of Nuclear Power Plant(VRIMOR).

11.Rindahl, G., et al., "International Conference on Safe Decommissioning for Nuclear Activities", IAEA, Berlin, 2002.

12.Vermeersch F , "The Combined Use of 3D Dose Assessment and Human Motion Simulation in ALARA D&D Problems", 7th ALARA Network Workshop in Decommissioning of Installations and Site Remediation.

13.F. Vermeersch, C. Van Bosstraeten, "Development of the VISIPLAN ALARA planning tool", Proceeding of the International Conference on Topical issues in Nuclear Radiation and Radioactive Waste Safety, Vienna Austria, 31-August to September 1999.

14.Philippe et al., "Dismantling of the Hot Cell Nr 41 at the SCK-CEN using the ALARA Planning Tool VISIPLAN".